

高低差のある天井に対応した 360°カメラによる総合天井伏図の自動生成

小濱大輝, ○永田吉輝 (名古屋大学), 安武和成 (株式会社クラフティア),
浦野健太, 米澤拓郎, 河口信夫 (名古屋大学)

Automatic Reconstruction of Reflected Ceiling Plans for Multi-Level Ceilings Using a 360° Camera
KOHAMA Daiki, NAGATA Yoshiteru (Nagoya University), YASUTAKE Kazushige (Kraftia Co., Ltd),
URANO Kenta, YONEZAWA Takuro and KAWAGUCHI Nobuo (Nagoya University)

キーワード: 現場調査, 天井高推定, Visual SLAM, SDF

1. はじめに

既存建物の改修工事の計画においては図面が必要である。しかし、竣工から数十年経過した建物では、現況図面が存在しない場合や、存在していても過去の改修が反映されていない場合がある。そのような場合、現場調査により現況図面を作成するが、屋内構造の寸法計測や設備の位置計測には多くの時間を要する。特に、天井設備の位置計測は、高所作業になりやすく設備数も多いため、作業効率が低下しやすい。3D レーザスキャナを使用すると、高精度に位置を記録できるが、機械が高価なため多くの現場では使用できない。

筆者らは、360°カメラを用いて総合天井伏図を自動生成する研究に取り組んできた。これまでに、屋内を撮影した 360°動画から天井伏図を自動生成できる手法を開発してきた[1,2,3]。しかし、この手法は高低差のない平らな天井を前提としており、適用可能な現場が限られていた。そのため、これまでの手法を高低差のある天井に対しても適用できるように改良をした。具体的には、画像に対して法線方向や深度を推定可能な深層学習モデルを用いて、天井領域とその天井高の推定を行い、平らな天井領域ごとにこれまでの手法を適用する。これにより、従来手法では対象外であった高低差のある天井に対しても、天井伏図生成を適用できる可能性が広がる。本稿では、まず従来の天井伏図自動生成ワークフローを概説し、次に高低差のある天井に対応するための天井領域・天井高推定手法を述べる。さらに、実現場で撮影した 360°動画に本手法を適用した結果を報告する。

2. 天井伏図自動生成ワークフロー

高低差のない天井を前提とした天井伏図自動生成ワークフローについて説明する。図 1 に示すように、屋内を歩きながら撮影した 360°動画を入力として、ワークフローは、(i)カメラポーズ推定・水平化、(ii)天井検出、(iii)天井パノラマ画像・天井伏図生成の 3 つの処理に分けられる。

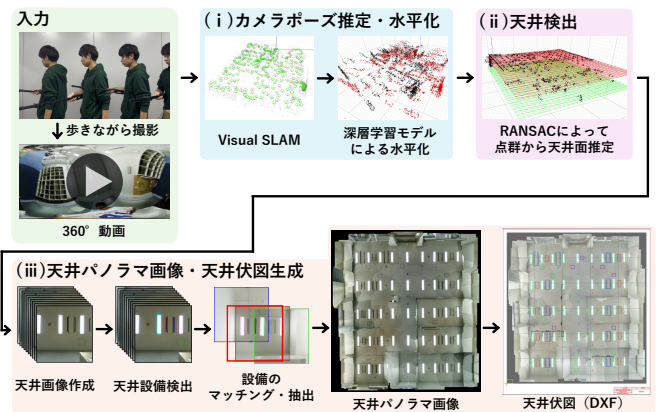


図 1 天井伏図自動生成ワークフロー

2.1. カメラポーズ推定・水平化

まず、(i)カメラポーズ推定・水平化について説明する。屋内を撮影した 360°動画に対して各フレームのカメラポーズ(カメラの位置と向き)を推定するために、Visual SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) を行う。Visual SLAM は動画から環境地図作成と自己位置推定を同時に行う技術であり、本研究では 360°動画に対応した OpenVSLAM[4]を用いる。Visual SLAM の出力は、キーフレームのカメラポーズと環境の疎な点群である。キーフレームは、一定程度環境が変化した時に挿入されるフレームである。Visual SLAM の出力は重力方向に整列していないので、画像から重力方向が推定可能な深層学習モデル[5]を用いて、水平化を行う。

2.2. 天井検出

次に、(ii)天井検出について説明する。天井面にキーフレームの 360°画像を投影して天井の写る画像を作成するために、天井検出を行う。高低差のない天井を仮定しているため、天井高さえ推定できれば、各キーフレームから天井面に対して画像を投影可能である。Visual SLAM の出力である点群から RANSAC (RANdom SAmple Consensus) を用いて天井面の推定を行い、天井高を取得する。

2.3. 天井パノラマ画像・天井伏図生成

最後に、(iii)天井パノラマ画像・天井伏図生成について説明する。カメラ位置から天井面までの距離に基づいて、各キーフレームの 360°画像から天井向きの天井画像を、透視投影変換により作成する。天井画像から天井設備の検出を行い、天井画像間で重複する設備をマッチングして 1 つに抽出する。天井全体を 1 枚の画像として見られるように、天井画像を撮影された位置に基づいて合成すると、天井パノラマ画像となる。合成時、設備を見やすくするために、検出した設備は 1 枚の画像から合成されるようにする。また、検出した設備を天井パノラマ画像と併せて DXF 上にプロットすると、天井伏図となる。

3. 天井領域・天井高推定

高低差のある天井に対しても天井伏図を生成できるようにするためには、(ii)天井検出の処理を天井領域とその天井高を推定する処理へと置き換える必要がある。本稿では、斜め天井や湾曲天井は対象外とし、高さの異なる複数の水平天井面から構成される天井を対象とする。天井領域・天井高推定は (I)キーフレーム天井領域マスク作成、(II)天井高推定・SDF (Signed Distance Field) 計算、(III)全体天井領域分割・高さ推定の 3 つの処理に分けられる。

3.1. キーフレーム天井領域マスク作成

まず、図 2 に示す(I)キーフレーム天井領域マスク作成について説明する。キーフレーム天井領域マスクは、キーフレーム画像内の天頂側で鉛直下向きの平面部分をマスクしたものである。マスク作成のために、屋内の単眼法線方向推定において高精度の Metric3Dv2[6]と単眼画像から高精度のメートルスケールの深度推定が可能な MoGe-2[7]を用いる。しかし、これらのモデルは 360°画像には対応していないため、キーフレームの 360°画像から天井側を写す透視投影画像を得る必要がある。そのため、360°画像に対して、方位角を 90°間隔で変化した 4 方向の透視投影変換を行う。各方向において、投影画像の中心視線は水平面から 45°上向きとし、垂直視野角は 90°に設定する。これにより、天井側を含む上方領域を 4 方向から観測した透視投影画像を得られる。4 枚の透視投影画像をそれぞれ、Metric3Dv2 と MoGe-2 に入力する。得られた法線方向画像で鉛直下向きから許容推定誤差 15°以内の鉛直下向きの平面と認められる部分をマスクする。得られた 4 枚のマスク画像を用いて、天頂方向を中心とするマスク画像を生成する。具体的には、各画像のうち画像上側 2/3 に対応する天頂から 60°以内の領域を抽出し、これらを合成して天頂方向を向いた 1 枚の画像を得る。以降、本処理を天頂向き合成と呼ぶ。

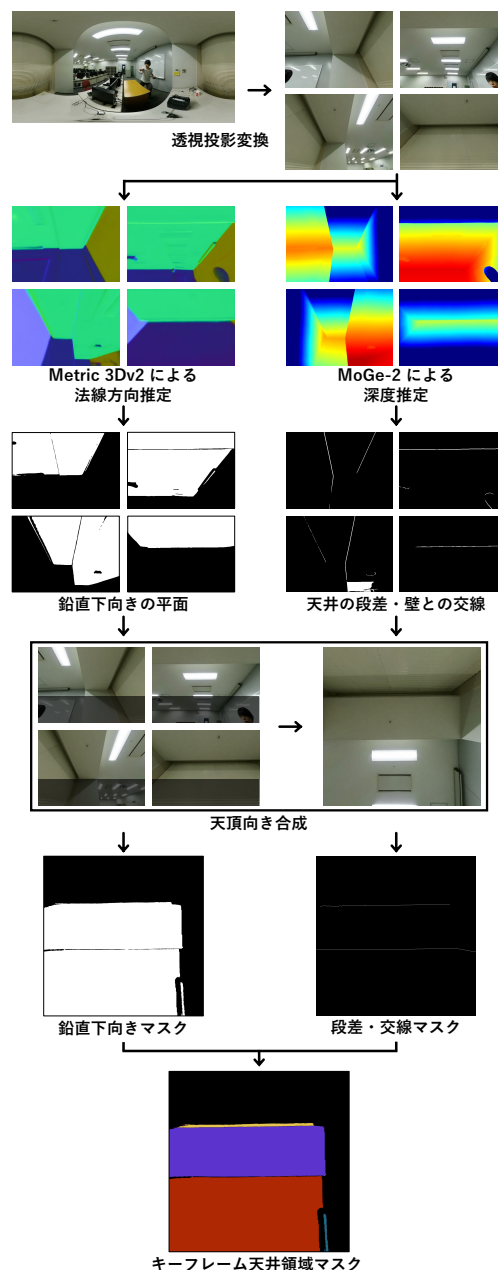


図 2 (I)キーフレーム天井領域マスク作成

MoGe-2 で得られた深度画像で鉛直方向の勾配が閾値以上の、天井の段差や壁との交線と認められる部分をマスクする。法線方向画像と同様に天頂向き合成を行い、4 枚のマスク画像から天頂を向いた段差・交線マスクを合成する。天井の段差や壁との交線は線であるため、合成後に細線化処理を行う。鉛直下向きマスクは、天井の段差が含まれてしまう場合があるため、段差・交線マスクと差を取り、キーフレーム天井領域マスクとする。

3.2. 天井高推定・SDF 計算

次に、(II)天井高推定・SDF 計算について説明する。キーフレーム天井領域マスクを接続部分ごとに分割し、分割マスクごとに天井高を推定する。推定には、Visual

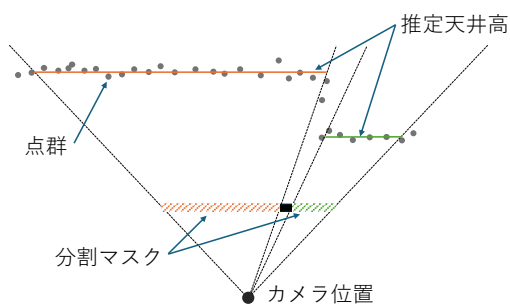


図3 天井高推定

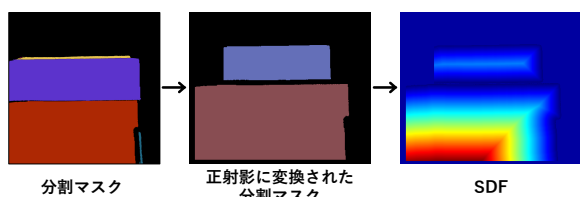
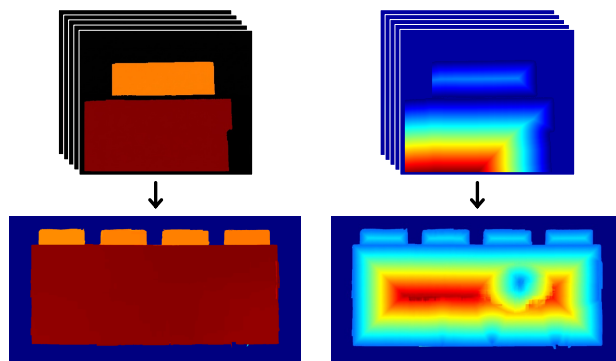


図4 正射影変換とSDF

SLAM の出力である点群を用いる。図3のように、キーフレームのカメラ位置から分割マスク部分に投影される点群を抽出し、その点群の高さの中央値を分割マスクの天井高とする。ただし、カメラ位置から本来見えない部分の点群を除くために、点群はキーフレームに特徴点として紐づいた点のみを使用する。キーフレーム天井領域マスクは透視投影なので、各分割マスクの高さに基づいて図4のように正射影に変換する。正射影に変換した分割マスクに対して、天井領域の分割を頑健にするために、SDF を計算する。SDF は、コンピュータグラフィックスや画像処理などで用いられる形状表現の一種であり、対象領域の境界までの最短距離を領域の内外を表す符号付きで各点に割り当てたものである。本研究では、領域の境界をマスクの輪郭として、マスクの内側を正、外側を負として SDF を計算する。ただし、マスクの輪郭が天井領域マスクの画像端と一致し、マスク領域が画像外へ連続している可能性がある場合には、当該輪郭部分を除外して計算する。

3.3. 全体天井領域分割・高さ推定

最後に、(III)全体天井領域分割・高さ推定について説明する。各キーフレームで分割マスクごとに推定した天井高と SDF を、図5に示すようにキーフレームのカメラ位置に基づいて統合し、天井高マップ、SDF マップとする。統合時、各2次元セルに値が重複した場合には中央値を採用する。天井領域の分割線を求めるために、天井高マップの勾配を求め、勾配が閾値以上大きい部分を分割線とする。勾配の閾値を動的に求めるため、値 $t(>0)$ 以上の勾配値の数を $f(t)$ とし、 $\frac{d^2}{dt^2}f(t)$ が $t>0$ ではじめに0となる t_0 を閾値とする。得られた天井領域の



天井高マップ SDFマップ
図5 天井高マップと SDF マップ

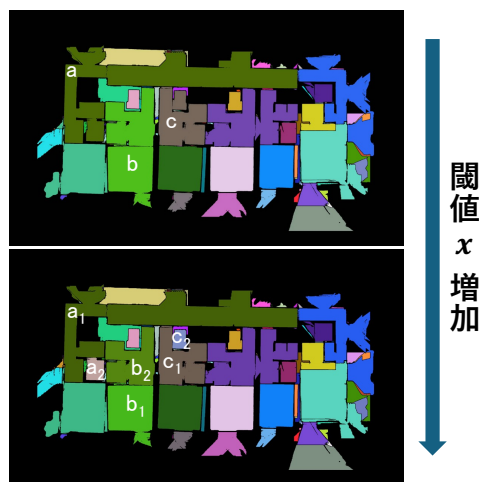


図6 閾値 x の増加に伴う領域の分割
(分かりやすい環境での例)

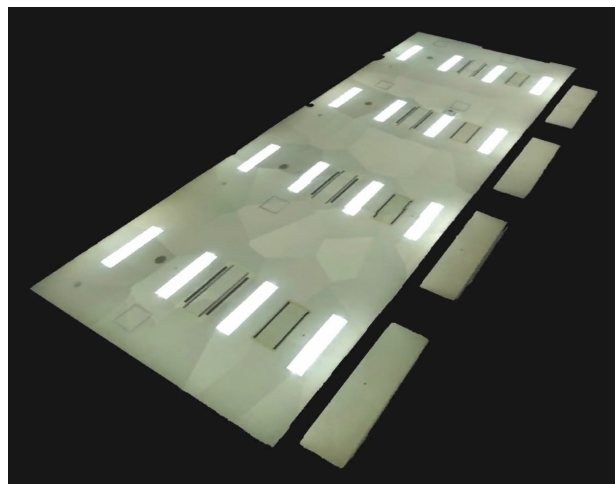
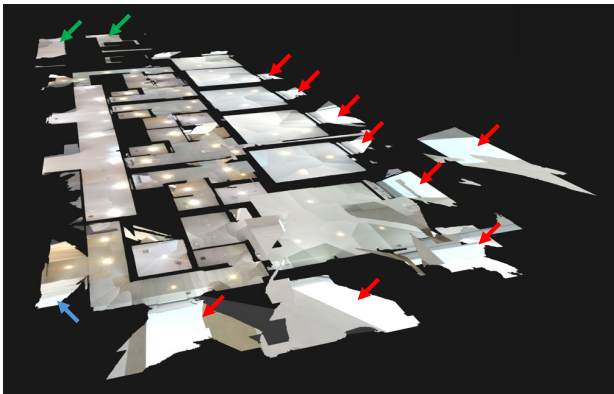
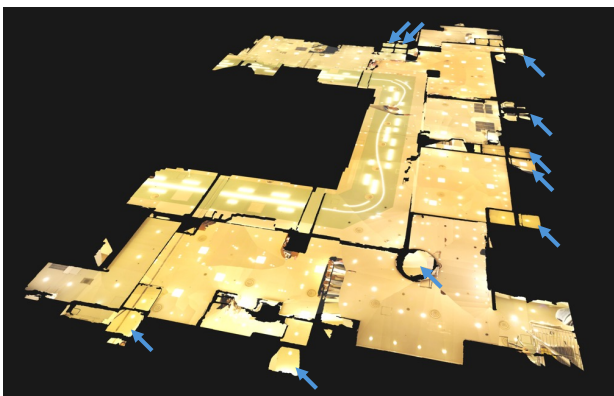


図7 折り下げ天井での処理結果

分割線と SDF を用いて領域を分割する。SDF はカメラポーズ推定誤差のノイズが乗りやすいので、 $SDF > x (x = 0, 0.1, 0.2, \dots, 4.9)$ の閾値 x を変更したマスクを作成し、分割結果が確かしい閾値を採用する。 $SDF > x$ によるマスクから天井領域の分割線を引いたマスクを作成し、接続領域により分割する。図6のように、より小さい $x = x_s (< x_t)$ で分割されていない大きな領域



現場A（ホテルの廊下と複数の客室）



現場B（商業施設）

図8 実際の現場で撮影された動画に対する処理結果が $x = x_t$ で分割された場合に、 x_t を閾値として採用する。領域分割後、各領域の高さを、領域内の天井高マップの値の中央値で再計算する。また、 $x_t > 0$ の場合、領域が縮小しているため、 $SDF > 0$ まで各領域を拡大する。

全体で分割された天井領域とその高さの推定結果を使用して、天井領域ごとに(iii)天井パノラマ画像・天井伏図生成の処理を行う。生成された結果を天井領域の位置・高さに基づいてプロットすると、折り下げ天井のある環境の天井を図7のように可視化できる。

4. 実現場動画への適用

実環境での有効性を確認するために、高低差のある天井を持つ実際の現場で撮影された2つの360°動画に対して本手法を適用した。処理結果を図8に示す。現場Aは、ホテルの廊下と複数の客室であり、廊下や客室入り口エリアと比較して、ベッドエリアを高天井と正確に推定できた。現場Bは、商業施設であり、通路部分と比較して、店舗区画部分を低天井と概ね正確に推定できた。しかし、現場Aでは、天井ではない窓に写った空（図8赤矢印）や壁面（図8緑矢印）を天井と誤認識した。この要因として、法線推定モデルによる空領域の鉛直下向き面への誤推定や、Visual SLAMにより出力された点群に含まれる誤差の影響が考えられる。また、両現場で

鏡に写る天井（図8青矢印）を天井領域として誤認識した。これらに対処するためには、天井を鉛直下向きの平面ではなく、意味的に「天井」を認識し、壁や床とともに総合的に推定する必要があると考えられる。さらに、Visual SLAMの推定誤差を吸収する手法やVisual SLAM自体の改善が必要である。

5. まとめと今後の展望

高低差のある天井に対しても、深層学習モデルを用いて天井領域・天井高を推定し、天井パノラマ画像合成を可能とした。本手法をこれまでに構築したワークフローに組み込めば、高低差のある天井に対しても天井伏図を自動生成できる可能性が広がる。今後は、天井領域・天井高推定の定量評価を行うとともに、斜め天井や湾曲天井も扱えるモデル化手法についても検討する。

参考文献

- [1] 小濱大輝 他：「天伏図作成補助システムにおける全方位カメラを用いた天井設備の多視点画像抽出手法」，第41回電気設備学会全国大会，pp.61-63 (2023.8)
- [2] 小濱大輝 他：「スマートフォン・全方位カメラを用いた作業効率化のための半自動天伏図作成システム」，空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集 令和6年度大会(佐賀)，pp.485-488 (2024.9)
- [3] Daiki Kohama, et al. : “Fixture-aware Panoramic Ceiling Image Synthesis using an Omnidirectional Camera, Journal of Information and Processing”, Vol.33, pp.245-258 (2025.3)
- [4] Sumikura, Shinya, et al. : “OpenVSLAM: A versatile visual SLAM framework”, In Proceedings of the 27th ACM International Conference on Multimedia, pp. 2292-2295 (2019)
- [5] Veicht, Alexander, et al. : “GeoCalib: Learning Single-Image Calibration with Geometric Optimization”, European Conference on Computer Vision, pp.1-20 (2024)
- [6] Hu Mu, et al. : “Metric3Dv2: A Versatile Monocular Geometric Foundation Model for Zero-shot Metric Depth and Surface Normal Estimation”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.46, Issue 12, pp.10579-10596 (2024.8)
- [7] Wang, Ruicheng, et al. : “MoGe-2: Accurate Monocular Geometry with Metric Scale and Sharp Details”, Advances in Neural Information Processing Systems 38, pp.35928-35959 (2026)